

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky**

**Analýza kvality elektrické energie
v ostrovních sítích**

**Analysis of Power Quality Parameters
in Off-Grid Systems**

Zadání bakalářské práce

Student:

Jindřich Coufal

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Analýza kvality elektrické energie v ostrovních sítích
Analysis of Power Quality Parameters in Off-Grid Systems

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Definice parametrů kvality elektrické energie v On-Grid vs Off-Grid systémech
2. Popis testovací platformy On/Off-Grid systému
3. Analýza kvality elektrické energie On/Off-Grid systému
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Cenek, M. a kol.: Obnovitelné zdroje energie, 2. upr. a dopln. vydání, Praha, FCC Public 2001, ISBN 80-901985-8-9
- [2] Štekl, J.: Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice, Praha 2003
- [3] Toman, P., Mišák, S., Drápela, J.: Provoz distribučních soustav, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04935-8
- [4] Mastný, P., Mišák, S., Drápela, J.: Obnovitelné zdroje energie, mČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04937-2
- [5] PŘÍLOHA 4 PPDS: PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ ZDROJŮ SE SÍTÍ
- [6] ČSN EN 50160

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne: 27. dubna 2016


.....
Jindřich Coufal

Poděkování

„Na tomto místě bych velice rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph.D., za velmi cenné rady, připomínky a odbornou pomoc na konzultacích při řešení mé bakalářské práce. Také výzkumné infrastruktury Centra ENET, díky které tato práce vznikla.“

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je provést analýzu kvality elektrické energie v ostrovní napájecí soustavě, která není připojena k distribuční síti. Dodávka elektrické energie do této sítě pochází z obnovitelných zdrojů elektrické energie, využívající sluneční záření, s možností akumulace přebytků elektrické energie pro následné pokrytí spotřeby v době, kdy nestačí aktuální dopad úhrnu slunečního svitu na fotovoltaické panely. Předmětem této analýzy je najít vztahy nebo souvislosti mezi překročením kvalitativních parametrů elektrické energie a meteorologickými veličinami. Analyzované data pocházejí z měření v roce 2015, které započalo po změně zapojení topologie sítě Off-Grid napájecího systému z AC na DC. Naměřená data z tohoto roku mají odpovédět na klíčovou otázku z pohledu kvality elektrické energie a to, zda-li je nyní možné provozovat ostrovní napájecí systém, využívající fotovoltaické napájecí systémy, autonomně a to bez překročení stanovených velikostí limitů kvalitativních parametrů elektrické energie, zejména podle převzaté evropské normy o charakteristikách napětí elektrické energie, jež je dodávána z veřejné distribuční sítě, s označením ČSN EN 50160.

Klíčová slova

Ostrovní systémy, parametry kvality elektrické energie, fotovoltaické systémy, obnovitelné zdroje elektrické energie, analýza

Abstract

The goal of this thesis is to analyze power quality in Off-Grid system, which isn't connected to distribution network. The supply of electric power to this network comes from renewable resource using solar power source with the ability to accumulate the excess of electric power to use it in times when the actual total sunlight caught on photovoltaic panels isn't enough. The aim of this analysis is to find relations between exceeding qualitative parameters and meteorological quantities. The analyzed data comes from measuring conducted in 2015 which started after the wiring change of network topology of Off-Grid feeding system from AC to DC. The data measured in that year are to answer the key question from the quality of electric energy point of view and whether it is possible to operate autonomic Off-Grid systems which uses photovoltaic supply system, without exceeding the limits of qualitative parameters of electric power, in particular these assumed from European norm labeled ČSN EN 50160 about characteristics of electric power voltage which is supplied from public distribution network.

Key words

Off-Grid systems, parameters of power quality, photovoltaic systems, renewable energy sources, analysis

Obsah

Úvod.....	- 9 -
1 Definice parametrů kvality elektrické energie v On-Grid vs. Off-Grid systémech.....	- 10 -
1.1 Parametry kvality elektrické energie.....	- 10 -
1.1.1 Kmitočet sítě.....	- 10 -
1.1.2 Velikost a odchylky napájecího napětí.....	- 10 -
1.1.3 Rychlé změny napájecího napětí - flickr.....	- 11 -
1.1.4 Krátkodobé poklesy napájecího napětí.....	- 11 -
1.1.5 Přerušení napájecího napětí.....	- 11 -
1.1.6 Dočasná nebo přechodná přepětí.....	- 12 -
1.1.7 Nesymetrie napájecího napětí.....	- 12 -
1.1.8 Harmonická a mezharmionická napětí.....	- 12 -
1.1.9 Úroveň napětí signálů.....	- 13 -
1.2 Srovnání kvalitativních parametrů On/Off-Grid.....	- 14 -
1.3 Selekcce parametrů PQ pro analýzu testovací platformy systému.....	- 15 -
1.3.1 Limity velikosti napětí a frekvence.....	- 15 -
1.3.2 Flickr, THD a harmonické napětí.....	- 16 -
2 Popis testovací platformy On/Off-Grid systému.....	- 17 -
2.1 Vybudovaná testovací platforma Off-Gridu na VŠB-TU v Ostravě.....	- 17 -
2.2 Popis analyzované topologie systému.....	- 18 -
2.3 Další možnosti a vize vybudované platformy systému VŠB-TUO.....	- 20 -
3 Analýza kvality elektrické energie On/Off-Grid systému.....	- 21 -
3.1 Výběr ideálních dnů.....	- 22 -
3.2 Slunný den.....	- 24 -
3.3 Zatažený den.....	- 26 -
3.4 Proměnlivý den.....	- 27 -
Závěr.....	- 28 -

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
Δf	%	Odchylka od jmenovité frekvence
f	Hz	Frekvence
t	s	Čas
G	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Úhrn slunečního svitu
P	W	Činný výkon
P_{bat}	W	Činný výkon z baterií
P_{lt}	-	Dlouhodobá míra vjemu flikru
P_{st}	-	Krátkodobá míra vjemu flikru
S	V·A	Zdánlivý výkon
THD	-	Celkové harmonické zkreslení
THD _i	-	Celkové harmonické zkreslení proudu
THD _u	-	Celkové harmonické zkreslení napětí
ΔU	%	Odchylka od jmenovitého napětí
U	V	Elektrické napětí
U_{harm}	%	Harmonické napětí
U_{n}	V	Jmenovité elektrické napětí

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vs.	versus (proti)
AC	Střídavý proud a napětí
BAT	Akumulační zařízení, baterie
ČR	Česká republika
DC	Stejnoseměrný proud a napětí
DS	Distribuční síť
FV	Fotovoltaický panel
FVE	Fotovoltaická elektrárna
G	Generátor
HDO	Hromadné dálkové ovládání
MS	Microsoft
OS	Ostrovní systém
OZE	Obnovitelný/é zdroj(e) energie
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PQ	Kvalita elektrické energie (power quality)
RMS	Efektivní hodnota (root mean square)
RN	Regulátor nabíjení (MPPT)
SW	Software
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1	Úrovně U na f signálů v % U_n ve veřejných DS nn	13
2	Dovolené odchylky napájecího U nn	16
3	Vyznačení limitů dovolené fluktuace síťového f	16
4	Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému (AC)	18
5	Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému (DC)	19
6	Jednotlivé zdroje a výk. elektronika v platformě OS	19
7	Zjednodušené blokové schéma analyzovaného OS (DC)	20
8	Vývoj autonomního Smart-Grid systému na VŠB-TUO	20
9	Záznamový monitorovací SW vybudované platformy	21
10	Selekce letního dne	22
11	Srovnání G v různých ročních obdobích	23
12	Letní den: P_1 , P_2 vs. G	24
13	Konverze toku energie v analyzované topologii	25
14	Zjed. blokové schéma analyzovaného DC topologie	25
15	PQ: Slunný den	26
16	PQ: Zatažený den	26
17	PQ: Proměnlivý den	27

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
1	Úrovně jednotlivých U_{harm} v předávacím místě v procentech U_n až do 25. řádu	12
2	Parametry kvality elektrické energie On-Grid vs. Off-Grid napájecího systému	14

Úvod

Vývoj energetické koncepce České republiky ovlivňuje zejména legislativa Evropské unie a politika státu. Současný trend rozvoje OZE vede k vývoji decentralizovaných autonomních malých elektráren, které svým propojením do aktivní distribuční sítě zvýší bezpečnost energetiky státu, podpořením stálosti dodávky elektrické energie ve špičkových stavech sítě. Pokud mají být decentralizované napájecí jednotky propojeny v tzv. Smart Gridu, musí splňovat kvalitativní parametry pro zamezení případné nežádoucí interference jednotlivých zdrojů elektrické energie sítě. Stále však nenacházíme ideální zdroje elektrické energie. Ve velkém množství nejsou OZE pro polohu ČR ekonomicky výhodné, a proto tvoří stále většinu výroby elektrické energie neobnovitelné zdroje. Cílem správné PQ je, aby zařízení nebo spotřebič pracoval se zamýšleným výkonem a účinností. V případě porušení PQ může dojít k poškození zařízení nebo spotřebiče, snížení životnosti nebo neočekávaným ztrátám. [1]

Problémy s kvalitou elektrické energie vzešly právě použitím OZE. Zrod těchto problémů nastává rozdílným zkratovým výkonem OZE, respektive jejich maximálním výkonem. Dále nahodilou dodávkou elektrické energie kvůli aktuálnímu stavu počasí nebo také vzájemnou interferencí OZE zapojených do aktivní DS. Pro správnou funkci, chod a životnost zařízení nebo spotřebičů musí být dodržovány kvalitativní limity, kterými se zabývají mezinárodní normativní organizace. Mezi ty dobře známé patří IEC (Int. Elektrotechnical Commission) a IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). V oblasti ostrovních systémů stále nejsou definovány všechny parametry elektrické energie. Některé limity kvalitativních parametrů také definují kodexy nebo pravidla napojení do rozvodné soustavy.

Analýza kvality elektrické energie spočívá ve zpracování naměřených dat z monitorovacího softwaru, který měřil data testovací platformy ostrovního systému na akademické půdě VŠB-TU v Ostravě v roce 2015. Model Off-Grid sítě byl navržen nízkoenergetická domácnost, která je napájena FVE. Výsledkem celé analýzy je najít souvislosti nebo vztahy mezi kvalitativními parametry elektrické energie, v oblasti životního prostředí tzv. meteorologické parametry (sluneční záření) a veličinami elektrickými (napětí, frekvence). Cílem celé koncepce vybudované platformy Off-Gridu je odpovědět na klíčovou otázku, a to zdali je ostrovní napájecí systém schopen pracovat autonomně a to bez ztráty kvalitativních parametrů elektrické energie.

1 Definice parametrů kvality elektrické energie v On-Grid vs. Off-Grid systémech

Parametry kvality elektrické energie definují mezinárodní technické normativní organizace a také normy, pravidla, kodex, limity, či podmínky provozování přenosových soustav distributorů. Tyto parametry musejí být ve stanovených limitech dodržovány, aby nedošlo k poškození elektrických zařízení nebo spotřebičů zapojených do napájecí sítě. Pro ostrovní síť jsou stanovené kvalitativní limity odlišné a definují je zatím pouze některé z norem. V následujících podkapitolách jsou rozebírány jednotlivé limity parametrů ovlivňující kvalitu elektrické energie zejména podle převzaté evropské normy ČSN EN 50160. Parametry kvality elektrické energie se také zabývají PPDS - příloha 4, norma o Elektromagnetické kompatibilitě ČSN EN 61000-4-30 a části podnikových norem energetiky PNE 33 3430-(0-7). Tyto normy a podmínky však čerpají svůj základ z hlediska limitních velikostí jednotlivých kvalitativních parametrů elektrické energie dominantně z evropské normy o charakteristikách napětí elektrické energie, která je dodávána z veřejné distribuční sítě s označením EN 50160. Rozvoj ostrovních autonomních soustav je zde až v posledních letech, proto některé parametry kvality elektrické energie pro takovýto systém stále nejsou definovány a přebírají tak velikostní limity od synchronně napojených systémů, tedy od On-Grid napájecích systémů.

1.1 Parametry kvality elektrické energie

Kvalita elektrické energie je popsána podle charakteristik napájecího napětí týkajících se zejména kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třífázových napětí. Níže popsané jednotlivé parametry kvality elektrické energie jsou podle dostupných norem, pravidel, kodexů nebo připojovacích podmínek pro nízké napětí. Dále jsou také uváděny parametry vysokonapěťových charakteristik napětí, které jsou mimo zadání této bakalářské práce, a proto zde nejsou probírány.

1.1.1 Kmitočet sítě

Jmenovitá frekvence napájecího elektrického napětí je 50 Hz. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota frekvence základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích [2]:

- u systémů se synchronním připojením k propojenému systému (On-Grid)

50 Hz \pm 1 %	(tj. 49,5 Hz ... 50,5 Hz)	během 99,5 % roku,
50 Hz + 4 %/- 6 %	(tj. 47 Hz ... 52 Hz)	po 100 % času.

- u systémů bez synchronního připojením k propojenému systému (Off-Grid)

50 Hz \pm 2 %	(tj. 49 Hz ... 51 Hz)	během 95 % týdne,
50 Hz \pm 15 %	(tj. 42,5 Hz ... 57,5 Hz)	po 100 % času.

1.1.2 Velikost a odchylky napájecího napětí

Normalizovaná velikost jmenovitého napětí pro veřejnou síť nízkého napětí je pro 4-vodičové trojfázové soustavy $U_n = 230$ V, mezi fázovým a středním vodičem. Pro 3-vodičové třífázové soustavy $U_n = 230$ V, mezi fázovými vodiči. Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení, musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v

měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $U_n \pm 10\%$. Všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $U_n +10\%$ / -15% . V mimořádných případech, kdy je oblast s dlouhým vedením může být rozsah i mimo stanovené limity, avšak odběratelé by o tom měli být informováni. [2]

1.1.3 Rychlé změny napájecího napětí - flikr

Dominantním parametrem kvality elektrické energie je tzv. flikr, který je způsoben intenzivní fluktuací napětí. Kolísání napětí je v důsledku časově proměnného zatížením napájené soustavy, respektive časovou změnou impedance sítě. Tento parametr zajímá i běžného odběratele, neboť rychlé změny napětí se projevují rušivě zejména u světelných zdrojů. Někdy proto také hovoříme o tzv. vjemu blikání. Reakce na flikr je subjektivní záležitostí.

Intenzita nepříjemnosti flikru je definována měřicí metodou flikru UIE-IEC a vyhodnocená veličinami P_{st} a P_{lt} . Krátkodobá míra vjemu blikání je měřena po dobu 10 minut. Dlouhodobá míra flikru je vypočítána z posloupnosti dvanácti hodnot P_{st} po dobu dvouhodinového intervalu použitím následujícího vztahu [2]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (1.1)$$

Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru $P_{lt} \leq 1$. Reakce na flikr se může měnit v závislosti na příčině flikru a na jeho délce trvání, po kterou se vyskytuje. V některých případech způsobuje $P_{lt} = 1$ obtíže, zatímco v jiných případech vyšší hladina P_{lt} obtíže nevyvolává. [2]

1.1.4 Krátkodobé poklesy napájecího napětí

Jsou způsobeny obecně poruchami v instalacích odběratelů nebo ve veřejné distribuční síti. Jsou to nepředvídatelné, převážně náhodné jevy. Četnost výskytu za rok se značně mění podle typu rozvodné sítě, místa sledování a také může být jejich rozložení během roku velmi nepravidelné. [2]

Za normálních provozních podmínek může být očekávaný počet krátkodobých poklesů napětí během roku od několika desítek až do jednoho tisíce. Většina krátkodobých poklesů napětí má dobu trvání kratší než 1 s a hloubku poklesu menší než 60 %. V některých oblastech se mohou velmi často vykytovat krátkodobé poklesy napětí s hloubkou 10-15 % U_n jako následek spínání zatížení v instalacích odběratelů. [2]

1.1.5 Přerušení napájecího napětí

Přerušení dělíme na krátkodobá a dlouhodobá. Za normálních provozních podmínek je roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí v rozsahu od několika desítek až do několika stovek. Přibližně 70 % krátkodobých přerušení bývá kratší než 1 s. V některých dokumentech se vychází z toho, že krátkodobá přerušení trvají do jedné minuty. Občas se však pro vyloučení dlouhodobých přerušení napětí používá řízené přerušení dodávky na tři minuty. [2]

Dlouhodobá přerušení označujeme jako poruchová a jsou obvykle způsobovány vnějšími událostmi nebo vlivy, kterým dodavatel nemůže předcházet. Pro roční četnost a doby trvání dlouhodobých přerušení není možné udat typické hodnoty, neboť existuje široké spektrum faktorů,

keré je ovlivňují (např. struktura uspořádání sítě, povětrnostní podmínky, vlivy třetích stran apod.). Za normálních provozních podmínek může být roční četnost přerušení napětí delších než 3 min menší než 10, avšak v závislosti na oblasti může dosahovat až 50. Pro předem dohodnutá přerušení se směrné hodnoty neuvádějí, protože tato přerušení se ohlašují s předstihem. [2]

1.1.6 Dočasná nebo přechodná přepětí

Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí se obecně objevují během poruch ve veřejné DS nebo v instalaci odběratele a zmizí jakmile je porucha odstraněna. Obvykle mohou tato přepětí dosáhnout v důsledku posunu uzlového bodu třífázové soustavy hodnoty sdruženého napětí. Za určitých okolností způsobí zkrat na straně vn transformátoru dočasné přepětí na straně nn, jehož doba trvání bude shodná s dobou trvání zkratového proudu. Takováto přepětí všeobecně nepřekračují 1,5 kV (RMS). [2]

Přechodná přepětí obecně nepřekračují 6 kV (vrcholová hodnota), náhodně se však vyskytují i hodnoty vyšší. Doby čela přepětí jsou velmi různé - od ms až po méně než μ s. [2]

1.1.7 Nesymetrie napájecího napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních RMS hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0-2 % sousledné složky. V některých oblastech, v nichž jsou instalace odběratelů částečně připojeny jednofázově nebo dvoufázově, se v odběrných místech mohou vyskytovat nesymetrie až do asi 3 %. Zpětná složka je rozhodující parametr pro možné rušení spotřebičů připojených do sítě. [2]

1.1.8 Harmonická a meziharmonická napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních RMS hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě uvedené v tab. 1. Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, přičemž také obtížně předvídatelné kvůli rezonančním jevům, jež mohou u jednotlivých harmonických způsobit napětí vyšší. [2]

Důležitým parametrem kvality elektrické energie je tzv. činitel harmonického zkreslení. THD_u zahrnuje všechny harmonické až do 40. řádu a musí být menší nebo roven 8 %. [2]

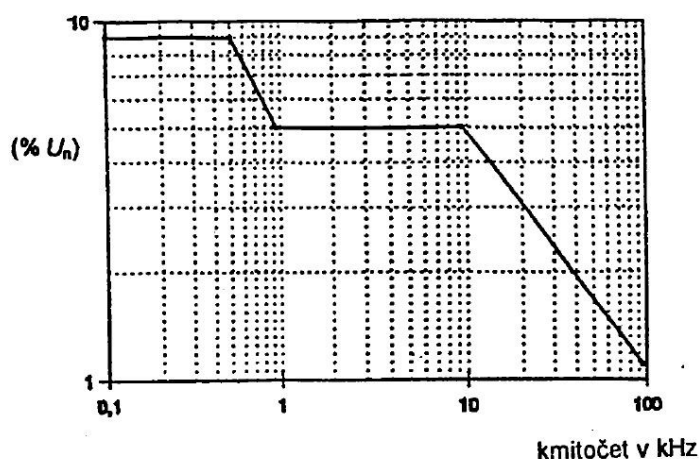
tab. 1: Úrovně jednotlivých U_{harm} v předávacím místě v procentech U_n až do 25. řádu [2]

Liché harmonické				Sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
Řád harmonické h	Harmonické napětí %	Řád harmonické h	Harmonické napětí %	Řád harmonické h	Harmonické napětí %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25					

Problematika meziharmonických napětí vzešla s rozvojem používání frekvenčních měničů a polovodičové techniky. Jejich hodnoty se v současné době studují pro normativní základ. V určitých případech způsobují meziharmonické i nízkých úrovní flickr nebo rušení v systémech HDO. [2]

1.1.9 Úroveň napětí signálů

V některých zemích využívají veřejnou DS k přenosu informací. Střední hodnota napětí signálu měřeného po dobu tří sekund musí být v 99 % dne menší nebo rovna hodnotám daným v obr. 1. V instalacích odběratelů se mohou používat pro přenosy informací po vedeních nosné signály s kmitočtem v rozsahu od 95 kHz do 148,5 kHz. I když použití veřejné DS pro přenos signálů mezi odběrateli není dovoleno, musí se ve veřejné DS nn brát v úvahu výskyt napětí na těchto kmitočtech až do hodnoty 1,4 V (RMS). Vzhledem k možnosti vzájemného ovlivňování sousedících signálních instalací může odběratel potřebovat ochranná opatření nebo vhodnou imunitu své instalace proti vlivu těchto signálů. [2]



obr. 1 Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_n ve veřejných DS nn [2]

Úroveň přeslechového napětí HDO by neměla při připojených vazbách HDO překročit hodnotu 0,3 % jmenovitého napětí. [3]

Mimo základní harmonickou existují tedy v síti nosné energetické signály, jež můžeme rozdělit na systémy HDO, středofrekvenční a vysokofrekvenční nosné systémy energetických vedení. Systémy HDO se vysílají jako sekvence impulzů, přitom každý impulz má dobu trvání od 0,1 s do 7 s a dobu trvání celé sekvence v rozsahu od 6 s do 180 s. Typická doba trvání impulzu je asi 0,5 s a doba trvání sekvence 30 s. Tyto systémy všeobecně pracují v kmitočtovém rozsahu od 110 Hz do 3000 Hz. Hodnota injektované sinusové vlny signálu je v oblasti 2-5 % U_n v závislosti na místní praxi, rezonance však může způsobit nárůst úrovní na 9 %. Na systémech instalovaných v poslední době jsou signály od 110 Hz do 500 Hz. [4]

Středofrekvenční nosné systémy energetických vedení jsou v rozmezí 3 kHz až 20 kHz a vysokofrekvenční nosné systémy energetických vedení v rozmezí 20 kHz až 148,5 kHz, přičemž jejich podrobný normativní popis se teprve připravuje. [4]

1.2 Srovnání kvalitativních parametrů On/Off-Grid

Nadefinované parametry kvality elektrické energie pro oblast nn se však ještě liší dle napojení systému. Systémy mohou být připojeny buď přímo na DS, tedy na mohou být v režimu On-Grid, jež se v normách taktéž označují jako synchronně napojené napájecí systémy. Taková napájecí soustava má zpravidla více napojených spotřebitelů elektrické energie. Její zkratový výkon je větší, než u Off-Grid napájecích systému a pohybuje se řádově ve 10^5 V·A a více. Více spotřebitelů také znamená daleko větší různorodou skladbu spotřebičů, které vyžadují stálost dodávky elektrické energie a její kvalitu v mnohem větší míře, než je tomu u systémů v Off-Grid režimu. Řeší se tedy určitá kompatibilita připojených spotřebičů, zejména pak u výpočetní techniky, spotřebičů se zabudovanou elektronikou a jiných dnes už běžně používaných spotřebičů v domácnostech, které bývají zpravidla frekvenčně a napěťově závislé. Kvalita elektrické energie může být také vysvětlována jako určitá kondice spotřebované elektrické energie, jež využívají připojené spotřebiče a zařízení. Kvalitní výkon umožňuje pracovat spotřebičům a zařízením s jejich zamýšleným výkonem. Pakliže se hodnoty odchylek kvality elektrické energie pohybují v překročených mezích nebo četnostech, může dojít k neočekávaným výkonovým ztrátám nebo i snížení celkové životnosti elektrického spotřebiče.

Kvalitativní parametry Off-Grid napájecího systému nejsou v současné době přesně specifikovány kromě fluktuace jmenovité frekvence napájecího elektrického napětí, které je 50 Hz. Za normálních provozních podmínek musí být střední hodnota frekvence základní harmonické měřená v intervalu 10 s v mezích ± 2 %, což odpovídá 49-51 Hz. Takový je limitní rozptyl frekvence, který musí splňovat napájecí systém během 95 % týdne. Během celého období připojeného systému v režimu Off-Grid musí být největší odchylka jmenovité frekvence 50 Hz ± 15 %, což odpovídá 42,5-57,5 Hz. [2] Takové opatření vzešlo kvůli skladbě spotřebičů, které můžeme v Off-Grid napájecí soustavě snáze ovlivnit, než u On-Gridu. Vezmeme v potaz běžnou skromnou domácnost, ve které se využívá elektrická energie pro běžné spotřebiče s nízkým zastoupením vnitřní elektroniky. Tedy domácnost, jež má skladbu spotřebičů uspořádanou tak, že je téměř frekvenčně nezávislá nebo je jejich limit fluktuace kmitočtu větší, než u dnešní moderní elektroniky. V takovém případě je myšlenka výstavby Off-Grid napájecího systému v pořádku. Stochastické fluktuování parametrů elektrické energie je způsobeno využíváním dnešním OZE, které jsou závislé na aktuálních meteorologických podmínkách. Kvalitu elektrické energie lze však také ovlivnit volbou topologie ostrovní sítě.

Srovnání parametrů kvality elektrické energie není zcela relevantní, protože jediný rozdíl tvoří velikost limitu fluktuace frekvence. Ostatní parametry kvality elektrické energie jsou převzaty z On-Grid napájecího systému, respektive tyto parametry nejsou dále specifikovány rozlišeně pro On-Grid vs. Off-Grid. Další specifikace limitů kvalitativních parametrů elektrické energie jsou předmětem odborných konferencí a vývoje.

V tabulce tab. 2 nejsou uvedeny odchylky pro případ dlouhých vedení (viz kap. 1.1.2). Mimořádná podmínka připojení elektroinstalace v jednofázové nebo dvoufázové koncepci je také vypuštěna. Dočasná a přechodná přepětí, přerušení napájecího napětí nebo mimořádné poklesy napětí se v kvalitě elektrické energie obvykle nevyhodnocují, pouze se o nich informuje, pokud nastanou. THD jednotlivých řádů harmonických jsou uvedeny v tab. 1. Úroveň napětí signálů je závislý na kmitočtu viz obr. 1.

tab. 2: Parametry kvality elektrické energie On-Grid vs. Off-Grid napájecího systému

Parametry	On-Grid	Off-Grid
f	49,5 Hz...50,5 Hz během 99,5 % roku	49 Hz...51 Hz během 95 % týdne
	47 Hz...52 Hz po 100% času	42,5 Hz...57,5 Hz po 100% času
U_n (fázové)	230 V	Pro Off-Grid napájecí systémy tyto parametry stále nejsou definovány.
Odchylky U_n	207 V...243,8 V 95 % týdne	
	195,5 V...253 V 100 % času	
P_{st}	Nedefinováno	
P_{lt}	≤ 1 (95% času)	
Nesymetrie napájecího napětí	0 % ... 2 % zpětné složky 95 % týdne	
THD	Do 40. řádu harmonické < 8 %	

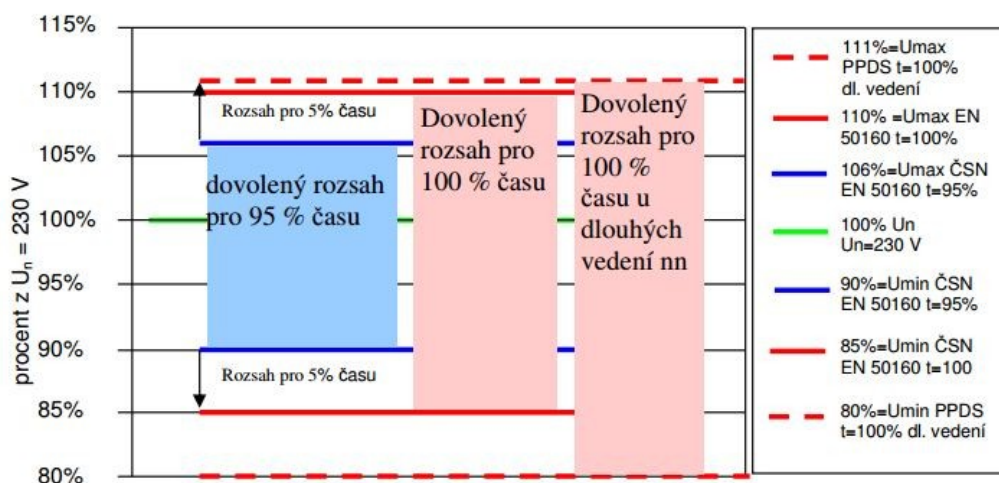
1.3 Selektce parametrů PQ pro analýzu testovací platformy systému

Cílem analýzy kvality elektrické energie v rámci vybudované testovací platformy je najít veličiny nebo vztahy mezi meteorologickými veličinami jako jsou teplota, tlak, úhrn slunečního svitu a veličinami elektrickými z pohledu kvality elektrické energie. Pro budoucí srovnání analýz různých napájecích systému v režimu Off-Grid jako je např. nově vybudované automobilové dopravní centrum (ADC), které v roce 2016 bylo také spuštěno v režimu Off-Grid s využitím FVE, je vhodné porovnávat data z období 2015, kdy byla z hybridního systému přepojena VT z hlavní přípojnice Off-Grid napájecího systému a dodávaný příkon byl pouze z FV1 a FV2, protože ADC je taktéž napájeno pouze z FVE. Výběr parametrů kvality elektrické energie pro analytické vyhodnocení je tedy vhodný z hlediska teploty a úhrnu slunečního svitu. Tyto parametry ovlivňují výrobu elektrické energie z obou FV. Výrobou se rozumí dodávaný výkon z FV1 a FV2, tedy příkon napájecího systému, který je vyhodnocován prioritně. Spotřeba, tedy celkový výkon spotřebičů je záležitostí zpětných vlivů. Odvětví kvality elektrické energie z hlediska zpětných vlivů na síť způsobené spotřebou je nad rámec této bakalářské práce a v budoucnu se problematikou zpětných vlivů pro zde analyzovanou testovací platformu bude zabývat samostatná bakalářská nebo diplomová práce.

1.3.1 Limity velikosti napětí a frekvence

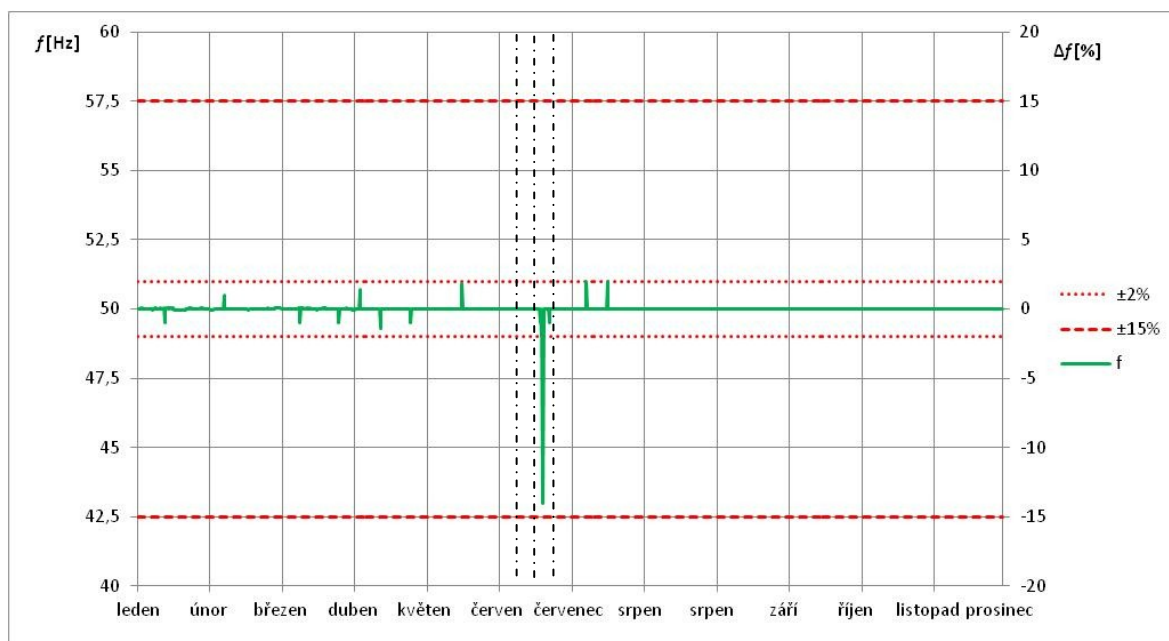
Pro síť nn platí, že velikost jmenovitého napětí U_n je 230V a musí být dodrženy limity +6 % a -10 % od tohoto jmenovitého napětí. Absolutní hodnoty takového napětí potom odpovídají velikostem v rozmezí od 207 V do 243,8 V. Tento limitní rozptyl platí u 95 % měřicích intervalů.

Pro 100 % měřicích intervalů jsou relativní odchylky +10 % a -15 % od jmenovitého napětí. Tomu odpovídají absolutně hodnoty napětí $\geq 195,5$ V a ≤ 253 V. U dlouhých vedení je potom fluktuace napětí +11/-20 % od U_n , což odpovídá velikosti limitního kolísání napětí ≥ 184 V a $\leq 255,3$ V pro 100 % měřicích intervalů, avšak tato hodnota není pro testovací platformu ostrovního systému důležitá. Procentuelní limity odchylek napětí jsou na obr. 2. [2]



obr. 2 Dovolené odchylky napájecího napětí nn [3]

Na obr. 3 jsou červeně vyznačené limity pro odchylky kmitočtu ostrovní sítě. Jedná se o ukázkou fluktuování tohoto kvalitativního parametru z hlediska dovolené četnosti v rámci celého roku. Odchylky do $\pm 2\%$ od jmenovité hodnoty frekvence mohou být 95 % týdne. Větší fluktuace kmitočtu mohou nastat pouze na 8h 21min v rámci jednoho týdne.



obr. 3 Vyznačení limitů dovolené fluktuace síťového kmitočtu během celého roku

1.3.2 Flikr, THD a harmonické napětí

Problematika rychlých změn napětí, celkového zkreslení tvaru průběhu napětí i proudu záleží dominantně na charakteru spotřeby, nikoliv na meteorologických veličinách. Tato analýza kvality elektrické energie zahrnuje vyhledávání souvislostí mezi meteorologickými a elektrickými veličinami, proto tyto kvalitativní parametry elektrické energie nejsou zcela relevantní. Takové parametry kvality elektrické energie jsou otázkou tzv. zpětných vlivů na síť, které nejsou v analýze PQ řešeny (kap. 3), neboť budou předmětem další samostatné bakalářské nebo diplomové práce.

2 Popis testovací platformy On/Off-Grid systému

Napájecí soustava DS je zdroj elektrické energie, jehož zkratový výkon se pohybuje řádově od $10^5 \text{ V} \cdot \text{A}$ a více. Takový napájecí systém není tolik náchylný na změnu zatěžovací impedance a v případě nahodilých špičkových stavů má prostředky pro jejich pokrytí. Naopak ostrovní napájecí energetické systémy s využitím OZE, které jsou závislé na aktuálních meteorologických podmínkách, mají stochastický charakter a nejsou snadno predikovatelné. Jejich zkratový výkon je dán ostrovním měničem. V případě využití více OZE je tento zkratový výkon proměnný v závislosti na aktuálním meteorologickém stavu. Při tvorbě koncepce takového systému se musí přihlížet i na strategickou polohu pro využití OZE s ohledem na meteorologické podmínky, budoucí spotřebu a využití celkového Off-Gridu. Napájecí Off-Grid systémy mají v současné době ve srovnání s DS menší zkratový výkon (řádově $10^3 \text{ V} \cdot \text{A}$). Naopak mezi výhody může patřit zejména autonomnost a možnost dodávky elektrické energie tam, kde není DS.

V současné době je také aktuálním tématem rozvoj tzv. Smart-Grid sítě, která právě využívá tyto decentralizované autonomní ostrovní napájecí systémy (Off-Gridy) jako špičkový zdroj elektrické energie. Taková DS se poté stává propojením aktivních autonomních distribučních sítí s konkrétními požadavky, zejména pak na kvalitu elektrické energie, které s využitím OZE. [5]

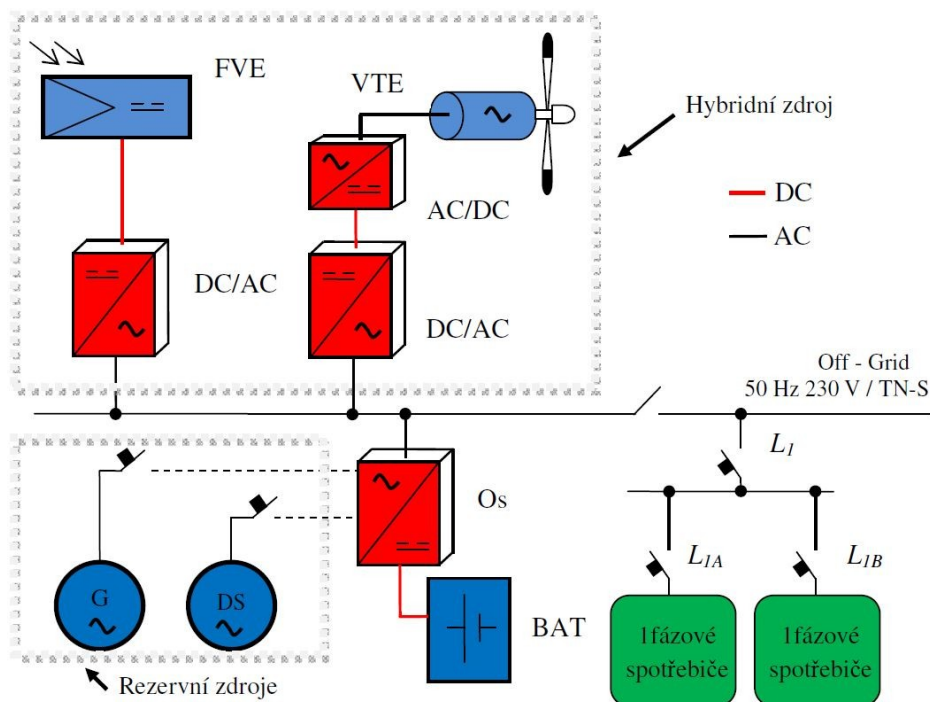
Off-grid topologie lze obecně rozdělit na AC a DC. Topologie AC potom také na 1fázové a 3fázové energetické napájecí systémy. V případě 1fázové AC topologie lze napájecí systém aplikovat do rodinného domu s disponibilním instalovaným výkonem jednoho ostrovního měniče od 2 do 8 kW. Pro náročnější aplikace je možná paralelní spolupráce tří ostrovních měničů s 1fázovým výkonem až 24 kW. Existují také dvě možnosti zapojení. První varianta je zapojení na tzv. By-Pass. Výhodou tohoto zapojení je možnost přímého hrazení spotřeby elektrické energie bez nutnosti zatížení ostrovního měniče. Nevýhodou je však vysoká fluktuace kmitočtu v mezích $\pm 4,5 \text{ Hz}$ a měnící se zkratový výkon napájecího systému. Druhá možnost zapojení využívá koncepci s regulátorem nabíjení. [1] Takový systém však využívá DC topologii a ta je předmětem této analýzy kvality elektrické energie.

2.1 Vybudovaná testovací platforma Off-Gridu na VŠB-TU v Ostravě

Fyzikální model testovací platformy Off-Grid systému vybudovaného v areálu VŠB-TU v Ostravě byl v letech 2014-2015 založen na koncepci By-Pass. Tuto koncepci označujeme také jako topologii AC, protože hlavní přípojnice je napájena střídavým napětím. Vybudovaný ostrovní systém sloužil pro vývoj nové koncepce v oblasti chránění, aktivního řízení spotřeby elektrické energie [1] a nyní také pro analýzu kvality elektrické energie v Off-Gridech s využitím OZE. V současné době je testovací platforma zapojena v DC topologii, která bude popsána v samostatné podkapitole se schématem zapojení. Na následujícím obr. 4 je znázorněno předešlé rozložení topologie ostrovního napájecího systému, od kterého se kvůli stochastickým fluktuacím napětí a frekvence upustilo. [6]

Vzniklé flukтуаční problémy parametrů PQ se eliminovaly změnou topologie sítě z AC na DC. Tato topologie je aktuální a samostatně dále popsána v kap. 2.2. Dále se také upustilo od hybridního napájení Off-Grid napájecího systému. V současné době je VTE napojena DS a dodávaný výkon pro ostrovní síť je pouze z FVE viz obr. 9, kde je zobrazeno aktuální topologie sítě v rámci orientačního

schématu v záznamovém monitorovacím softwaru. Dále je také využíván také aktivní systém řízení spotřeby (ADSM), který je popisován v odborném článku [7].

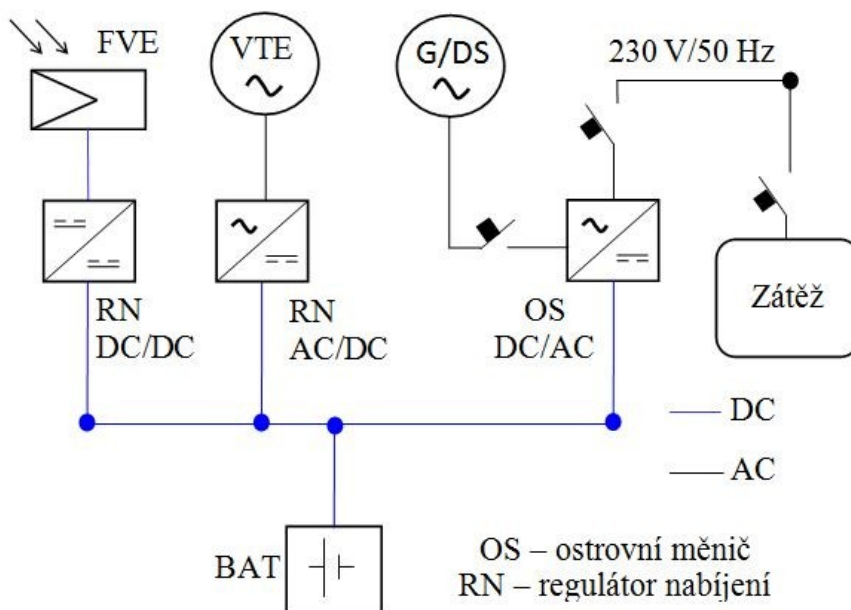


obr. 4 Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému, By-Pass koncepce. [8]
(G- elektrocentrála, Os- ostrovní měnič, L_1 - hlavní proudový okruh, $L_{1A,B}$ – vedlejší proudové okruhy)

Výše zmiňovaná AC topologie však nesplňovala kvalitativní parametry elektrické energie. Problémy s kvalitou elektrické energie nastávaly při náhlém odlehčení napájecího systému od zátěže při slunných dnech, kdy byl dodáván výkon z FV1 a FV2 téměř na maximum. Takové situace vedly k častým projevům fluktuace síťového kmitočtu. Naopak jarní dny, kdy bylo počasí proměnlivé a byl proměnlivý úhrn slunečního svitu, vedly stochastické meteorologické stavy ke kolísání síťového napětí. [6]

2.2 Popis analyzované topologie systému

Off-Grid napájecí systém, který využívá koncepci s regulátorem nabíjení je druhou možností zapojení. Zjednodušené blokové schéma zapojení je na obr. 5. Obdobně jako u By-Pass koncepce ostrovní měnič vytváří podmínky definované pro standardní AC jednofázovou síť střídavého napětí, do níž lze integrovat jednotlivé elektrické spotřebiče. Ostrovní měnič také odpovídá za chod ostrovní sítě a udržuje napětí i frekvenci AC sítě neustále v přípustných kvalitativních limitech. V tomto návrhu nového uspořádání se o nabíjení akumulátorů stará regulátor nabíjení. Výkon FVE je vyveden do regulátoru nabíjení, který nabíjí akumulátory a napájí DC stranu ostrovního měniče. Výhodou tohoto systému jsou nižší pořizovací náklady a díky regulátoru nabíjení rychlejší nabití akumulčních baterií. Další výhodou, která je daná odlišnou konfigurací zapojení jednotlivých konverzních prvků je, že na AC stranu ostrovní sítě se nepřipojují žádné elektrické zdroje (FVE a VTE). Nedochází ke změně zkratového výkonu v AC ostrovní síti připojováním a odpojováním jiných elektrických zdrojů. Nevýhodou této koncepce zapojení Off-Grid systému je, že výkon FVE je vyveden na DC stranu výkonové části systému. Tato koncepce zapojení nedokáže pokrýt větší spotřebu elektrické energie než je maximální výkon ostrovního měniče. [8]



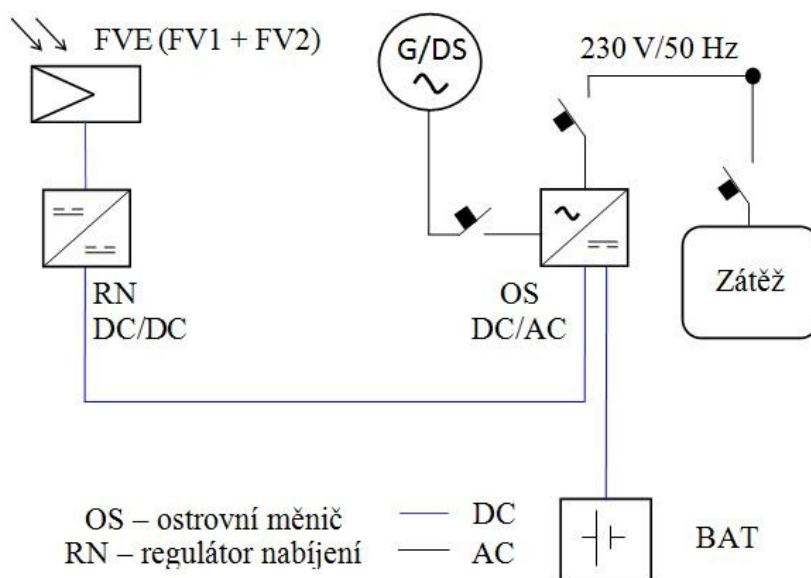
obr. 5 Zjednodušené blokové schéma Off-Grid systému (koncepte s regulátorem nabíjení) [8]

DC Off-Grid topologie je vhodná pro aplikace s malým instalovaným výkonem. Výhodou tohoto systému zapojení je jednoduchost a nižší konstrukční náklady v podobě krátkých vzdáleností a poměrně nízkého výkonu systému. Tyto systémy jsou provozovány na hladině 12, 24 a 48 V DC. K zásadním nevýhodám malého napětí ovšem patří vyšší provozní proudy a nutnost zvolení vyšších průřezů kabelů k minimalizaci ztrát. Další podstatnou nevýhodou je omezená dostupnost komerčních spotřebičů na DC napětí. Optimální nabíjení a vybíjení akumulátorů je zajištěno regulátorem dobíjení. K ostrovnímu systému lze připojit spotřebiče napájené stejnosměrným proudem. Tyto systémy získávají uplatnění například jako zdroj elektrické energie pro malé chaty, karavany, napájení dopravní signalizace, telekomunikačních zařízení nebo monitorovacích přístrojů v terénu. [9] [10] [11]



obr. 6 Jednotlivé zdroje a výkonová elektronika použitá v testovací platformě Off-Grid systému [1]

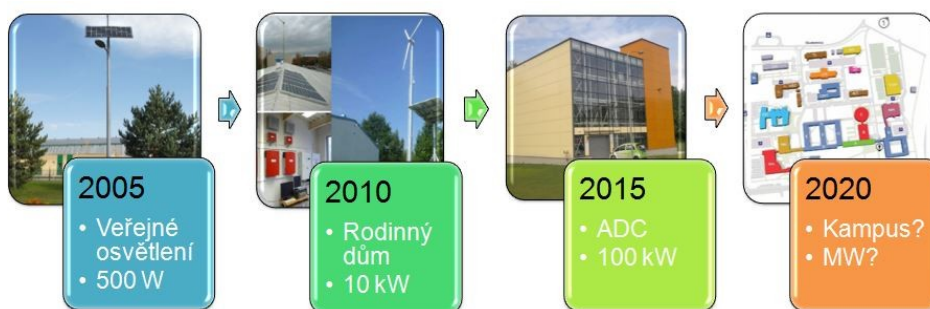
Pro analýzu kvality elektrické energie jsou použity data z období 2015, kdy byla odpojena VTE. Důvodem odpojení VTE byla hypotéza ovlivnění fluktuace kvalitativních parametrů vzájemnou interferencí OZE. Dodávaný příkon do ostrovní sítě tak zajišťovala pouze jeden monokrystalický fotovoltaický panel FV1 a jeden polykrystalický fotovoltaický panel FV2 o parametrech viz [12]. Pro tuto analýzu je zapotřebí znát pouze nejvhodnější vztažnou hodnotu k příkonu a výkonu, což je největší dodávaný výkon, tedy výkon zkratový. Zkratový výkon ostrovního napájecího systému je dán ostrovním měničem o hodnotě 4,2kW [1].



obr. 7 Zjednodušené blokové schéma analyzovaného OS (DC topologie) s využitím pouze FVE

2.3 Další možnosti a vize vybudované platformy systému VŠB-TUO

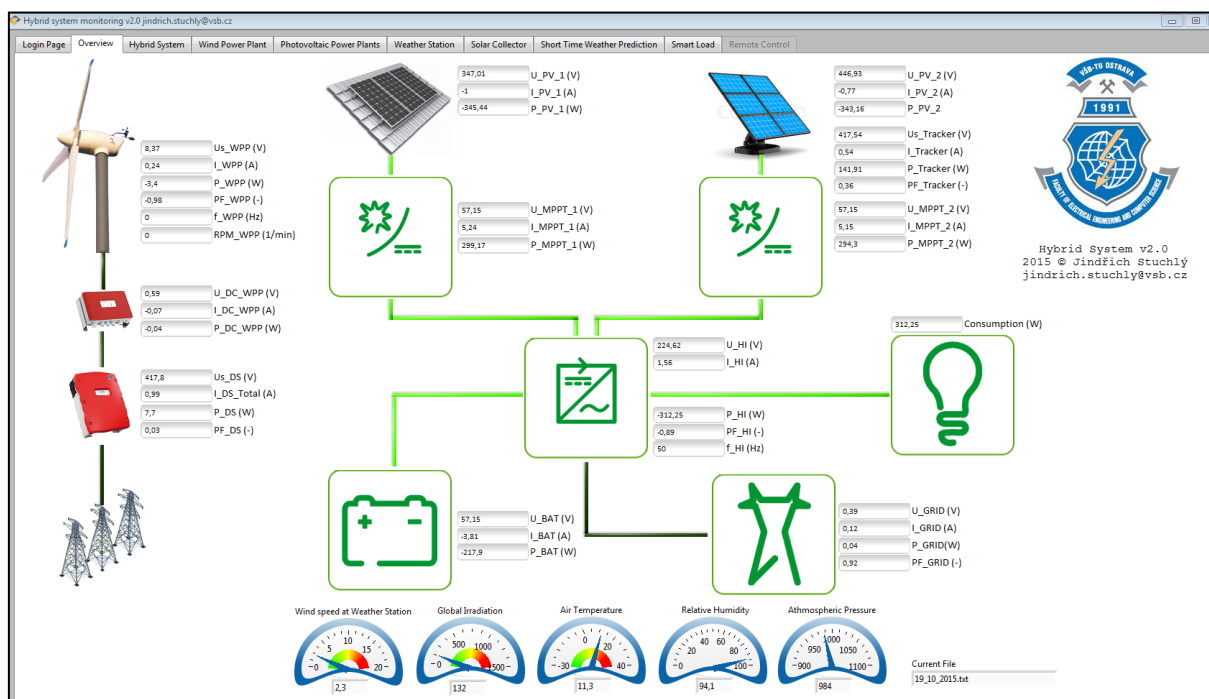
V roce 2005 byla vytvořena první mikrogridová síť, která pokryla spotřebu veřejného osvětlení o výkonu 500 W z malé FVE a VTE. Za dalších 5 let byl spuštěn rodinný dům o instalovaném výkonu 10 kW, přičemž spotřebovaný výkon byl hrazen Off-Grid napájecí sítí, kterou nyní analyzuji ve své bakalářské práci z pohledu PQ. Letošní rok 2016 se spustilo autonomně i automobilové dopravní centrum, kde byla vize instalovaného výkonu 100 kW a do budoucna je napojení celého kampusu VŠB-TUO jako jednu uzavřenou ostrovní síť, která bude fungovat autonomně a to bez ztráty kvality elektrické energie s ohledem i na spolehlivost dodávky elektrického energie. Důležitou roli u těchto vystavěných systémů hraje soudobost, neboť zatím nejsou energetické zdroje pro pokrytí všech vestavěných spotřebičů a zařízení.



obr. 8 Koncepce vývoje autonomního Smart-Grid systému na VŠB-TUO [13]

3 Analýza kvality elektrické energie On/Off-Grid systému

K elektrickým a meteorologickým veličinám je nutné zaznamenávat také příslušný čas. Pokud nebyl pořízen záznam z monitorovacího SW, který byl navržen v prostředí Labview viz obr. 9 [8], pocházejí naměřené data z měřicího přístroje BK-ELCOM ENA 500. Takové data se musely exportovat do textového souboru s naměřenými daty včetně parametrů kvality elektrické energie pomocí softwaru BK-Report [14]. Tyto data musí být následně zpracovány a spárovány s meteorologickým záznamem v programu MS Excel. Pokud nejsou pořízená meteorologická data z meteorologické stanice těžké laboratoře (HARD), která je součástí vybudované testovací platformy, dochází ke zkreslení analýzy kvality elektrické energie, neboť úhrn slunečního svitu může nabývat naprosto různých hodnot, protože data pocházejí ze vzdálenějších meteorologických stanic. Meteorologický záznam by měl být snímán v co největší blízkosti od FVE. Záleží tedy na aktuálního stavu meteorologických podmínek v daném místě výroby elektrické energie.



obr. 9 Záznamový monitorovací software vybudované testovací platformy

Praktickou část zpracování analýzy dat usnadnily velice hypotézy, které vzešly z dlouhodobého sledování chování vybudovaného OS na akademické půdě VŠB-TUO. Cílem analýzy kvality elektrické energie v ostrovní síti tedy bylo potvrdit nebo vyvrátit tyto hypotézy o nežádoucích stavech elektrických veličin v závislosti na meteorologických podmínkách, které se mění v různých ročních obdobích. Pro analýzu PQ jsou referenčními parametry napětí a frekvence, jež jsou závislé na úhrn slunečního svitu a teplotě [15]. Rychlost větru zde není zkoumána, respektive vyráběný výkon z VTE musel být nulový, neboť je analyzována topologie DC s vizí případného srovnání s následující analýzou kvality elektrické energie nově vybudovaného automobilového dopravního centra (ADC).

Následující analýza je tedy zaměřena na vztah mezi elektrickými a meteorologickými veličinami s podmínkou výroby elektrické energie pouze z FVE bez dodávky z VTE. Tím se nabízí

vytvořit skladbu scénářů tzv. ideálních dnů v různých ročních obdobích. Ideálně slunný den reprezentuje letní den, ideálně zatažený den zimu a proměnlivý den zase jaro nebo podzim.

Zajímavé scénáře z hlediska pohledu kvality elektrické energie jsou také časově závislé diagramy, které jsou ovšem záležitostí skladby připojených spotřebičů. Jedná se o analýzu zpětných vlivů spotřebičů s využitím OZE, které jsou nad rámec této bakalářské práce. Jedná se o scénáře diagramů denních, týdenních (pracovní týden vs. víkend), měsíčních i ročních. Je zde tedy kladen velký důraz na široké časové spektrum naměřených dat, které jsou podrobeny analýze kvality elektrické energie, včetně jednotlivých parametrů THD nebo i flikru.

Pro názornou ukázkou analýzy kvality elektrické energie je vhodné vykreslovat grafy veličin, které jsou v poměrných velikostech nebo v procentech ve srovnání s procentuálními odchylkami, které stanovují normy od jmenovitých hodnot sledovaných parametrů kvality elektrické energie, které jsou probírány v kap. 1. Pro vyhodnocení jsem zvolil vykreslení příkonu a výkon v procentních velikostech, které jsou vztaženy k max. výkonu ostrovního měniče 4,2 kW [1]. Na vedlejší ose jsou vykresleny procentní odchylky frekvence a napětí v rozmezí $\pm 15\%$. Zvolené rozmezí je dáno dovoleným limitem odchylky pro kmitočet ostrovní stě. Pro napětí se odchylky mohou pohybovat maximálně mezi $+10\%$ a -15% . Přesné podmínky jsou probrány v kap. 1.

3.1 Výběr ideálních dnů

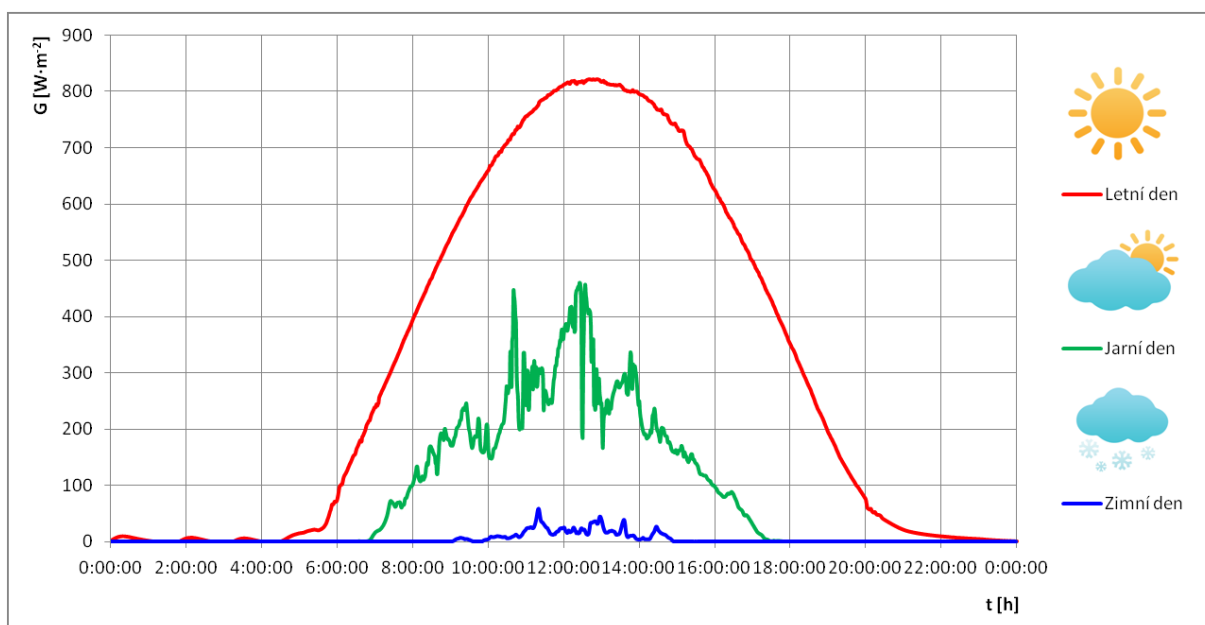
Tzv. ideální typy dnů mají ukázat extrémy, které lze v rámci meteorologických podmínek lze dosáhnout. Rozlišit lze ideálně slunný den (léto), ideálně zatažený den (zimou) a den proměnlivý, který je charakteristický pro jaro nebo podzim. V tabulkovém procesoru MS Excel byla provedena analýza podle referenčního parametru úhrnu slunečního svitu. Průnik největší sumy úhrnu slunečního svitu za den, maxima a střední hodnoty s ohledem na stejné statistické hodnoty parametru teploty a s podmínkou odstávky VTE byl vybrán den letní. Pro takto stanovenou analýzu není vhodné hledat např. pouze nejteplejší den, zvoleným způsobem vyhledání pouze maximální hodnoty teploty za období celého roku, protože tato teplotně nejvyšší hodnota v roce mohla také ještě v ten den značně klesnout, a proto je nutné hledat průnik více statistických hodnot. Celá situace je na obr. 10.



obr. 10 Selektce letního dne

Pro selekci zimního dne jsou vyhledávány hodnoty dle obr. 10 úplně stejně zaměněním maximálních hodnot na minimální. Proměnlivý den reprezentující jaro, klade potom důraz zejména na četnost a velikost odchylek od středního aritmetického průměru úhrnu slunečního svitu a teploty po celý den. Po vyhledání příslušných hodnot a zvážení nejvhodnějšího dne, který je přiřazen k naměřené hodnotě byl celý den podroben analýze kvality elektrické energie z hlediska kvalitativního parametru frekvence a velikosti napětí, přičemž byl hledán vztah k meteorologickým veličinám pro vyhodnocení vzájemného ovlivňování.

Vybrané dny reprezentující typický den pro jednotlivé ročního období, přičemž jaro je zaměnitelné s podzimem, neboť se z pohledu vybraného způsobu analýzy, která vzejde z parametru úhrnu slunečního svitu a teploty se den projevuje obdobně, tedy proměnlivě. Na následujícím obr. 11 je srovnání slunečního záření jara, léta a zimy.



obr. 11 Srovnání úhrnu slunečního svitu v různých ročních obdobích

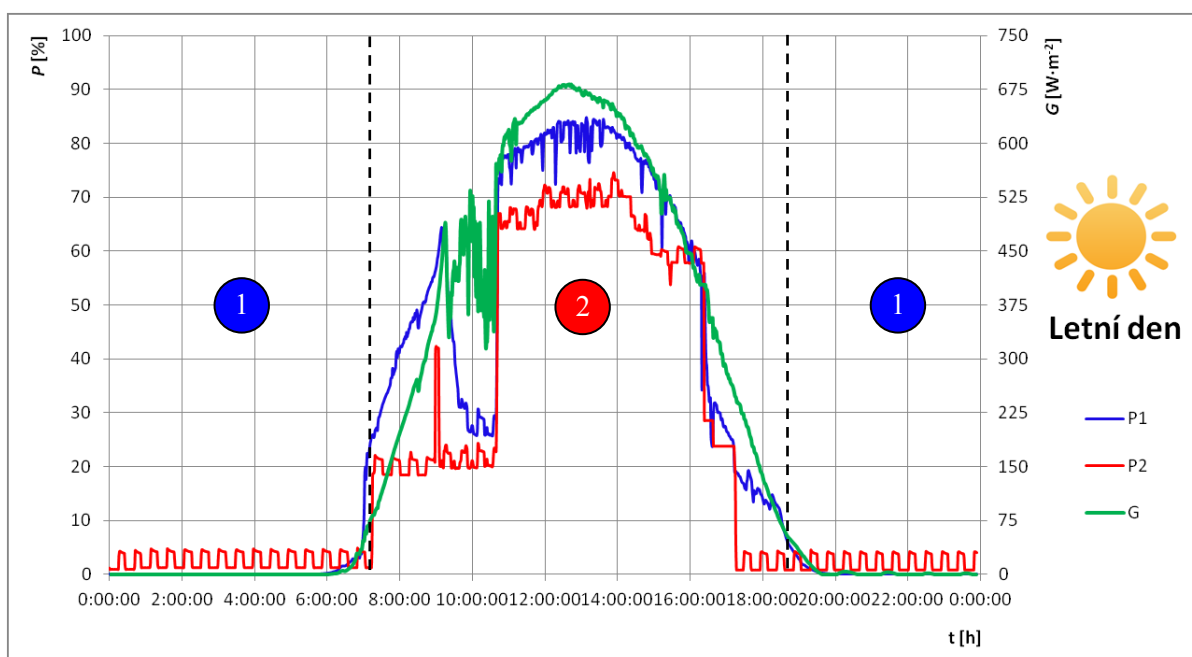
Letní den dominuje ve velikosti úhrnu slunečního svitu. Jeho typická hodnota v parném dni dosahuje mezi $800\text{--}1200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [16], což odpovídá i v naměřených datech z období 2015. Jarní den nabývá polovičních hodnot G , zato však ve velkých a četných odchylkách od středního aritmetického průměru, což odpovídá právě definici proměnlivého dne, který můžeme brát i za podzimní.

V typicky zimním dni nedosahuje G ani $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, což je často diskutovatelným problémem FVE, který se v praxi často řeší právě hybridními ostrovními napájecími systémy, který je mimo jiné vybudován na testovací platformě VŠB-TUO a je předmětem této analýzy. Pakliže je OS hybridní, hradí spotřebu elektrické energie v létě dominantně FVE a v zimě VTE, přičemž v proměnlivých dnech vyrábějí střídavě podle meteorologických podmínek. Příznivým meteorologickým podmínkám lze předejít pouze vhodně zvolenou geologickou polohou výstavby jednotlivých elektráren, což je předmětem koncepce Off-Grid napájecího systému na úplném začátku a je jedním z hlavních atributů pro zvážení výstavby takového systému [8].

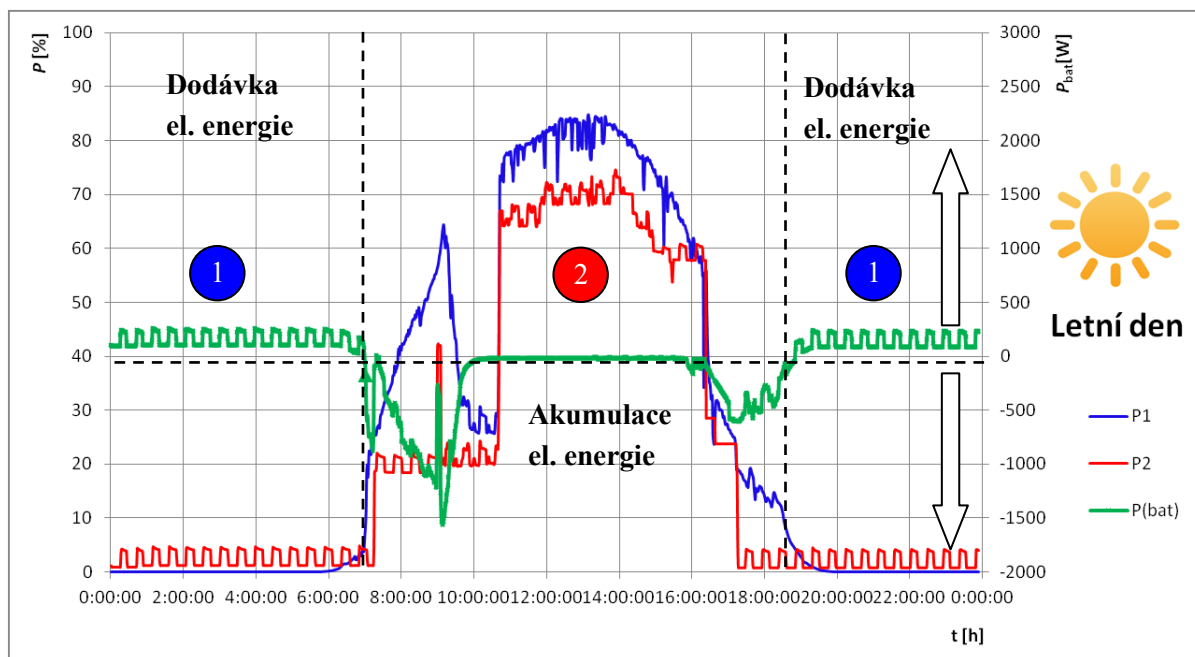
3.2 Slunný den

Aktuální zapojení topologie DC testovací platformy Off-Gridu funguje na základě tří možností toku energie, které označuji jako režim 1-3 a ty pokrývají aktuální stav spotřeby elektrické energie v OS. Spotřeba je zde označována jako výkon ostrovní sítě P_2 . U prvního režimu je dodávka el. energie hrazena pouze z akumulacních baterií přes ostrovní měnič. Pokud je OS v režimu 2, dochází k přímé dodávce el. energie z FVE přes RN a ostrovní měnič. Pakliže dochází k přebytkům elektrické energie, potom se tato nevyužitá energie akumuluje v bateriích. Zde dochází ke konverzi toku elektrické energie, neboť teče opačným směrem, než je tomu v režimu 1. Volbu režimu i velikosti aktuální spotřeby řídí tzv. ADSM (Active Demand Side Management system) [7].

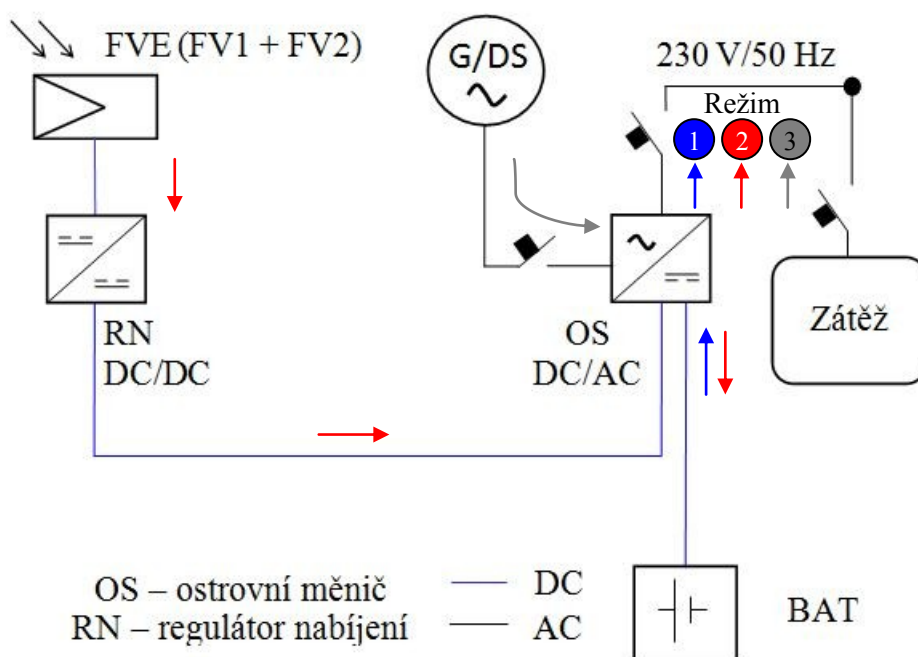
Pro ukázkou poslouží typicky slunný den, jehož úhrn slunečního svitu začíná prudce vzrůstat okolo sedmé hodiny ranní. Do této doby je platforma ostrovního systému v režimu 1. Naakumulovaná elektrická energie v bateriích napájecího systému pokryje noční spotřebu a tok energie jde z akumulacních baterií přes ostrovní měnič do jednotlivých zátěží, které jsou aktuálně připojené k síti, což je naznačeno na obr. 12. Režim 2 nastává po 7 hodině, když sluneční svit začíná prudce vzrůstat, takže i FV1 a FV2 začínají dodávat elektrickou energii do sítě, respektive začínají dodávat příkon P_1 . Tento příkon pokrývá aktuální spotřebu elektrické energie přímo z fotovoltaických panelů, přes regulátor napětí a ostrovní měnič s možností akumulace přebytků elektrické energie. V pravé poledne nastává maximum úhrnu slunečního svitu, také i maximum dodávaného příkonu Off-Grid sítě v tomto dni, který následně klesá. Po 17. hodině zareaguje ADSM na změnu příkonu a po 19. hodině dojde opět ke konverzi toku energie a napájecí systém dodává energii z akumulacních baterií. Takovouto situaci jsem verifikoval podle naměřeného výkonu z baterií, který je také součástí rozsáhlé databáze naměřených dat vybudované testovací platformy. Třetí režim je nežádoucí, tím je dodávka elektrické energie napájecího systému zajištěna záložními zdroji nebo napojením do On-Grid napájecí sítě (DS).



obr. 12 Úhrn slunečního svitu během celého slunného den

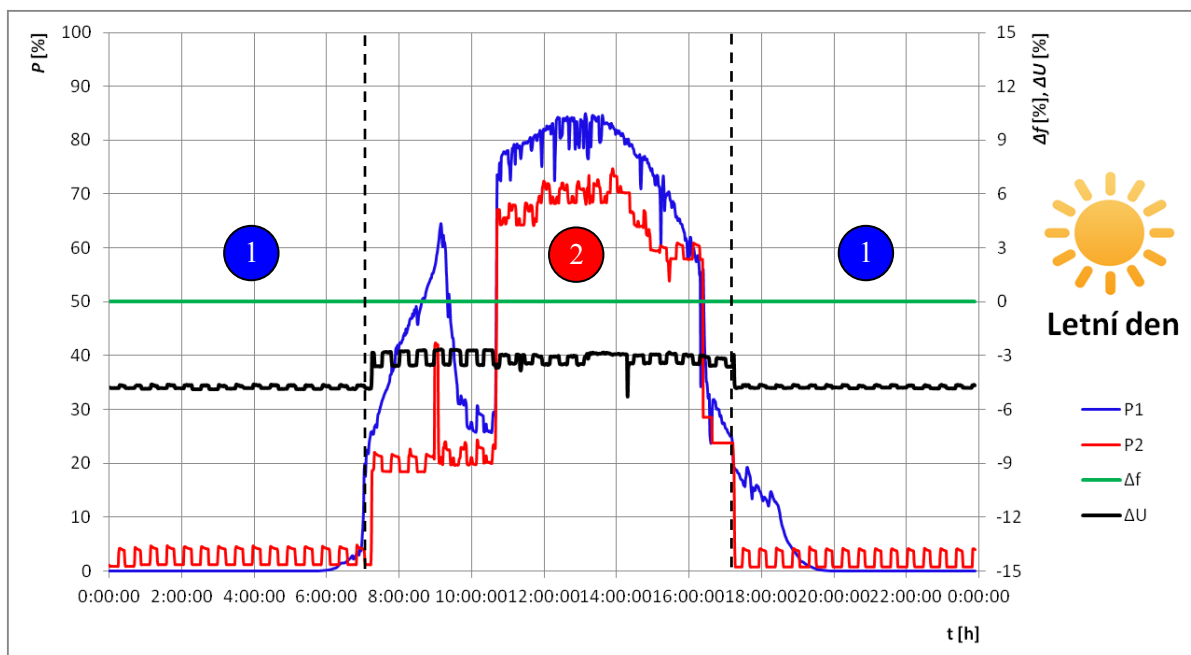


obr. 13 Konverze toku elektrické energie u akumulátorů ve slunném dni



obr. 14 Zjednodušené blokové schéma analyzované DC topologie (s vyznačením konverze toku el. energie v závislosti na aktuálních meteorologických podmínkách)

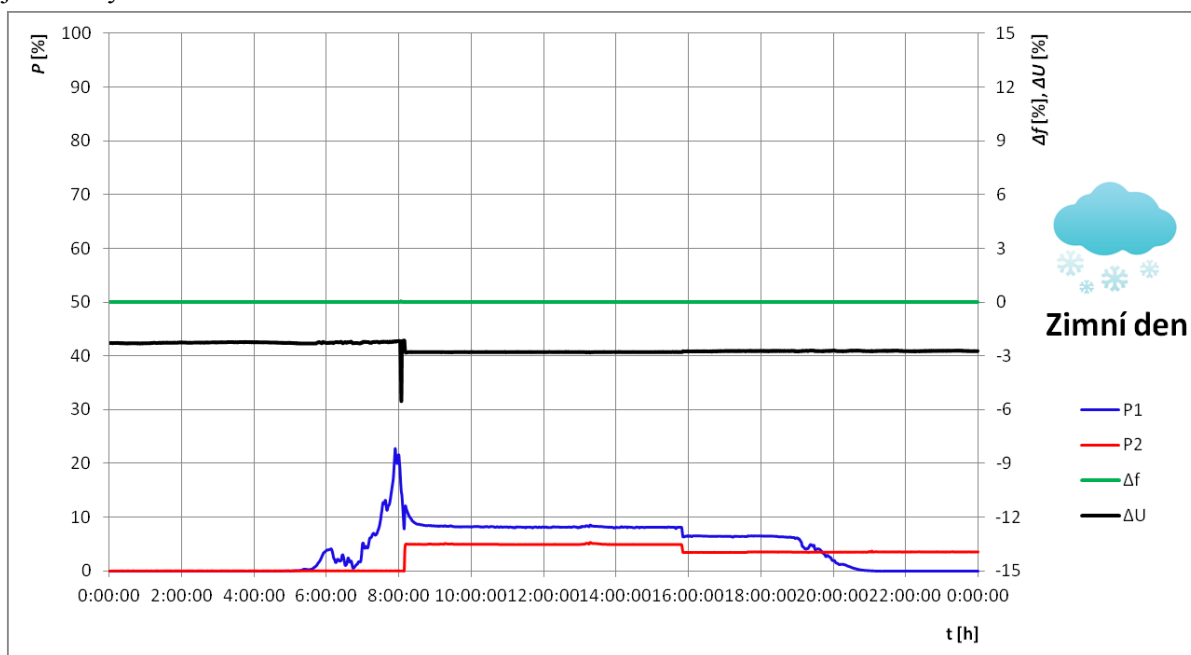
Z pohledu PQ zde dochází pouze k fluktuaci U , které nepřekračuje povolené normativní limity viz kap. 1. K těmto změnám U dochází kvůli změně impedance spotřeby. Odchytky napětí jsou do 3 %, způsobené v souvislosti aktivního řízení spotřeby elektrické energie, přičemž f sítě nabývá zanedbatelných odchylek v řádech 10^{-3} %. V dopoledních hodinách také došlo ke kolísání úhrnu slunečního svitu, který má za důsledek snížení dodávaného příkonu z FVE, a tím i snížení spotřeby kvůli reakci ASDM. Tato fluktuace slunečního záření způsobená stochastickou oblačností však neměla na PQ v aktuálním zapojení OS vliv. Vliv na parametry PQ také neměl zvýšený příkon dodávající v režimu 2, který je ve slunných dnech typicky mezi 80-100% zkratového výkonu OS.



obr. 15 PQ: Slunný den

3.3 Zatažený den

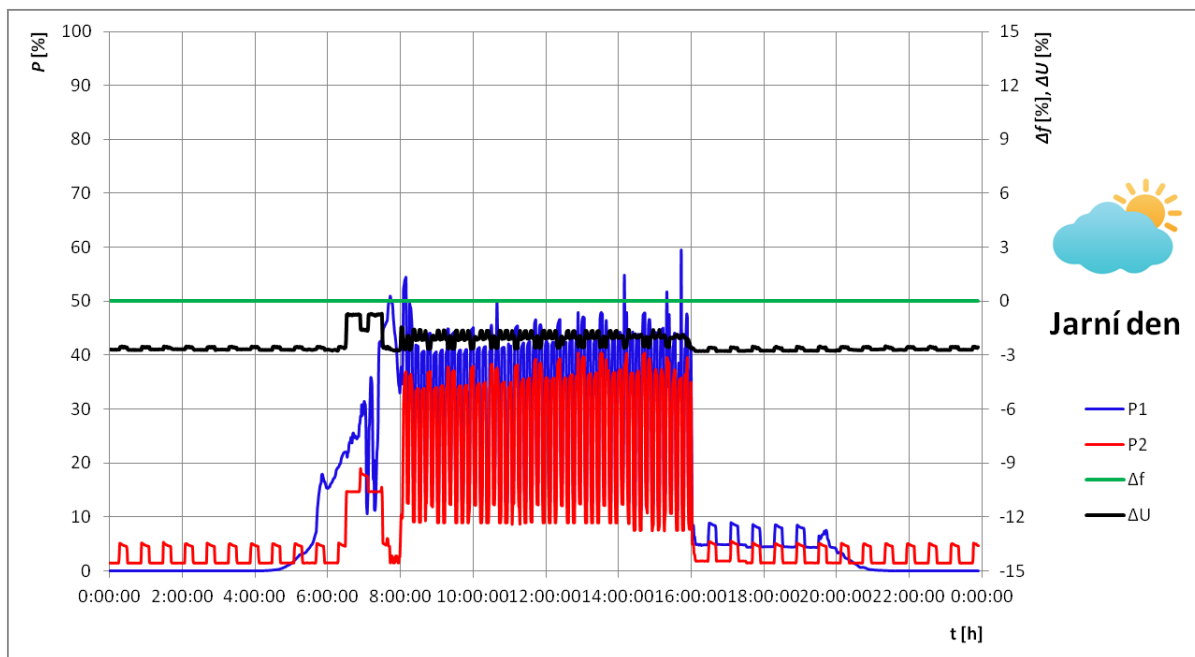
V následující analýze neuvádím průběhy úhrnu slunečního svitu ani výkonu z akumulčních baterií, neboť se jejich chování projevují obdobně jako v kap. 3.2. Příkon OS roste v přímé úměrnosti s úhrnem slunečního svitu a konverze toku energie nastane 2x, a to po 8. a 19. hodině. Tento den je typický pro zimu, kdy je úhrn slunečního svitu minimální kvůli stálé oblačnosti. Z pohledu PQ je jediná naměřená fluktuace napětí v 8 hodin, kdy ASDM zareagoval na příkon FVE zapojením vhodné velikosti zátěže. Opět nejsou porušeny velikosti limitů PQ z hlediska odchylek f a U od jejich jmenovitých hodnot.



obr. 16 PQ: Zatažený den

3.4 Proměnlivý den

U tohoto dne byl z hlediska toku el. energie režim 1 do 5:30. Následoval režim 2, kde byly přebytky el. energie akumulovány do baterií pro pokrytí spotřeby v období poklesu úhrnu slunečního svitu po 20. hodině. Podle stochastického příkonu z FVE řídil ASDM výkon OS. Naměřená frekvence opět nedosahuje žádných známek fluktuace a napětí kolísá také v předepsaných velikostech limitů PQ kvůli řízené (proměnlivé) zátěži.



obr. 17 PQ: Proměnlivý den

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vyhodnocení naměřených dat z roku 2015, které jsou kontinuálně měřeny a následně exportovány do textových souborů z monitorovacího systému testovací platformy Off-Gridu. Vyhodnocení těchto dat odpovídá na hlavní otázku této práce: zda-li je ostrovní napájecí systém, využívající obnovitelné zdroje elektrické energie, schopen pracovat autonomně a to bez ztráty kvalitativních parametrů elektrické energie.

V současnosti již byly provedeny analýzy kvality elektrické energie pro topologii AC využívající tzv. by pass. Tato AC topologie byla vytvořena v rámci testování hybridního Off-Grid napájecího systému využívající FVE a VTE jako kombinovaný zdroj elektrické energie pro autonomní režim napájení nízkoenergetického domu po celý rok. Napájecí systém vykazoval četné známky fluktuace kmitočtu a napětí v závislosti na aktuálním meteorologickém stavu. Při typicky proměnlivém dni kolísala úhrn slunečního svitu dopadající na FVE, což mělo za následek také kolísání napětí. Jestliže nastal typicky slunný den, který vykazoval při poledních hodinách sluneční záření až $1200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, fluktoval kmitočet sítě. Kmitočet sítě také kolísala při výrazném odpojování zátěží v ostrovní napájecí síti. Tyto nežádoucí flukтуаční stavy parametrů kvality elektrické energie více překračovaly stanovené limity četností výchylek, než jejich samotné velikosti, které stanovuje dominantně evropská norma EN 50160.

Při srovnání kvalitativních parametrů stanovené normami, kodexy nebo podmínek připojovacích distribučních soustav jsem došel k závěru, že velikosti a četnosti limitů parametrů kvality elektrické energie zatím tvoří převzatá evropská norma ČSN EN 50160. V této problematice je jediný rozdíl mezi On-Grid vs. Off-Grid u výchylky a četnosti kmitočtu napájecího systému. Ostatní kvalitativní parametry nejsou specifikovány pro Off-Grid a platí tak pro ně stejné limity a četnosti jako v On-Gridu viz tab. 2.

Monitorovací systém zaznamenává velké množství elektrických i meteorologických veličin s příslušným časem i datem. Tyto veličiny byly na základě selekce podle ovlivnění parametrů výroby separovány pro další statistické vyhodnocení v programu MS Excel. Dalším cílem bakalářské práce bylo najít možné souvislosti nebo vztahy mezi meteorologickými veličinami a parametry kvality elektrické energie, které byly v minulosti již zaznamenány. Proto jsou výsledkem této analýzy PQ vykreslené grafy z vybraných dnů reprezentující den slunný, zatažený a proměnlivý v rámci naměřených dat nové topologie DC s odpojením VTE.

Podle vybraných typických dnů nevykazoval autonomní Off-Grid napájecí systém překročení stanovených velikostí a četností kvalitativních parametrů. Může za to uspořádání systému do DC topologie s možností aktivního řízení spotřeby (ASDM) na základě aktuálního příkonu ostrovní sítě. V tomto uspořádání jsou dva žádoucí režimy toku elektrické energie, které provádí konverzi v závislosti na aktuálních meteorologických podmínkách. Pokud je dostatek příkonu z FVE spotřebiče a zařízení jsou napájeny přímo z FVE přes regulátor napětí a ostrovní měnič, který v případě přebytků akumuluje elektrickou energii v bateriích. Tento režim lze nazvat denním. Po poklesu úhrnu slunečního svitu na FVE nastává režim 2, kde nastává konverze toku elektrické energie v rámci ostrovního systému a dodávka el. energie je hrazena z baterií přes ostrovní měnič do spotřebičů a zařízení s využitím ASDM. Třetí režim je nežádoucí. Pro udržení autonomnosti ostrovního systému by tento režim musel využívat náhradní zdroj elektrické energie, který je v tomto případě zastoupen diesel agregátem.

Pokud ani tento náhradní zdroj elektrické energie nepokryje spotřebu, musí se síť připojit k On-Grid napájecí soustavě, čímž ztratí svoji autonomnost a kvalita elektrické energie je zde posuzována podle standardních kritérií, které přesně nadefinovány v normě ČSN EN 50160.

Výsledky celé analýzy kvality elektrické energie ostrovní sítě v tomto topologickém uspořádání verifikují, že tento napájecí systém může fungovat autonomně, bez ztráty kvalitativních parametrů elektrické energie. Nyní nenastává fluktuace vybraných parametrů kvality elektrické energie v závislosti na meteorologických veličinách, kvůli aktivnímu řízení spotřeby a dodávce elektrické energie přes ostrovní měnič v každém režimu toku elektrické energie. Další parametry kvality elektrické energie, které jsou závislé na aktuální spotřebě jsou záležitostí tzv. zpětných vlivů a nebyly zde vyhodnocovány. Touto problematikou se bude zabývat samostatná práce.

Použitá literatura

- [1] J. Vramba, *Disertační práce: Vývoj koncepce chránění pro Off-Grid systém*, 1 ed.. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2015.
- [2] ČSN EN 50160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě*. Český normalizační institut, 2000.
- [3] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 3 - KVALITA ELEKTRINY V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ, ZPŮSOBY JEJÍHO ZJIŠŤOVÁNÍ A HODNOCENÍ*. PROVOZOVATELÉ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV, 2006.
- [4] ČSN EN 61000-2-2: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Český normativní institut, 2002.
- [5] BENEŠ, Ing. Ivan a Ing. Jaroslav ROSA. Zvýšení odolnosti distribuční soustavy proti důsledkům dlouhodobého výpadku přenosové soustavy ČR s cílem zvýšení bezpečnosti obyvatel: (Představení projektu 2A-1TP1/065 RESPO). In: Výpadek elektřiny [online]. České Budějovice: CityPlan spol., 2010 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: http://vypadekelektriny.cz/wp-content/plugins/google-document-embedder/load.php?d=http%3A%2F%2Fvypadekelektriny.cz%2Fwp-content%2Fuploads%2Fzvyseni_odolnosti_distribucni_soustavy.pdf
- [6] S. Misak, L. Prokop and P. Bilik, "Power quality analysis in off-grid power system", in *2014 ELEKTRO*, 2014, pp. 337-342.
- [7] S. Mišák, J. Stuchlý, J. Platoš and P. Krömer, "A heuristic approach to Active Demand Side Management in Off-Grid systems operated in a Smart-Grid environment", in *Energy and Buildings*, 2015, vol. 96, pp. 272-284.
- [8] S. Mišák and L. Prokop, *Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů*, Vydání první.. Ostrava: Asociace technických diagnostiků ČR, o.s., 2014.
- [9] Hybrid Inverter [online]. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.altestore.com/store/Inverters/Off-Grid-Inverters-Capable-of-Grid-Tie/Xantrex-XW6048-Hybrid-InverterCharger/p5956/>
- [10] "SUNNY ISLAND 6.0 H/ 8.0 H: sma.de. SMA SOLAR TECHNOLOGY AG". [Online]. Available: <http://www.sma.de/en/products/off-grid-inverters/sunny-island-60h-80h.html>. [Accessed: 2016-04-21].
- [11] S. Misak, L. Prokop and P. Kacor, "Results from hybrid off-grid power system operation analysis", *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp. 1-3, 2011.

- [12] "Studentská grantová soutěž (SGS): Popis komponent". [Online]. Available: <http://hybridni-system.vsb.cz/popis-komponent/>. [Accessed: 2016-04-26].
- [13] STUCHLÝ, Jindřich. Problematika provozu energeticky soběstačných domů [online]. In: . [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: http://www.stech.cz/Portals/0/Konference/2015/04%20Inteligentni%20budovy/pdf/04_stuchly.pdf
- [14] "BK-Report: Uživatelský manuál: Analýza naměřených dat", 2009. [online]. In: . ELCOM, a.s. Divize Virtuální instrumentace, 2009 [cit. 2016-01-13]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/cz/ke-stazeni/merici-systemy/testandmeasurement-cz/system-monitoringu-a-analyzy-kvality-elektriny-bk-elcom-uzivatelske-manualy/bk-report-analyza-namerenych-dat/stahnout>
- [15] Obnovitelné zdroje elektrické energie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. pp. 66-67. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [16] M. Vrtek, *Sluneční energie*, 1 ed.. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava: Fakulta strojní - Katedra energetiky, 2012.